

RC梁に接着したFRPシートの曲げ付着特性に与える シート補強量の影響

著者	栗橋 祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一
雑誌名	コンクリート工学年次論文集
巻	22
号	1
ページ	481-486
発行年	2000-07
URL	http://hdl.handle.net/10258/1432

RC梁に接着したFRPシートの曲げ付着特性に与える シート補強量の影響

著者	栗橋 祐介, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一
雑誌名	コンクリート工学年次論文集
巻	22
号	1
ページ	481-486
発行年	2000-07
URL	http://hdl.handle.net/10258/1432

論文 RC 梁に接着した FRP シートの曲げ付着特性に与えるシート補強量の影響

栗橋祐介^{*1}・岸 徳光^{*2}・三上 浩^{*3}・松岡健一^{*4}

要旨 : FRP シートを用いた RC 梁の合理的な曲げ補強設計手法を確立するため, FRP シート補強 RC 梁の曲げ載荷実験を行った。本研究では特に RC 梁のシート補強量やせん断スパン比が FRP シートの曲げ付着性状に与える影響について検討を行っている。本研究結果より, シート補強量の少ない場合はせん断スパン比に関わらず上縁コンクリートの圧壊に伴うシート剝離破壊, シート補強量の多い場合は圧壊以前に剝離破壊する傾向にあることが明らかとなった。

キーワード : RC 梁, FRP シート, せん断スパン比, シート補強量, ピーリング現象

1. はじめに

近年, 既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物を対象として耐震性能の向上および新活荷重対策を目的とした補強工事が盛んに行われている。これらの補強工事には従来の鋼板を用いた接着工法に加え, 繊維強化プラスチック (FRP) シートを用いた接着工法も多く採用されるようになってきた。一方で, FRP シートを用いた RC 構造物の補強設計法が種々提案されているが, 未解明な部分も残されているのが現状である。特に, RC 部材を FRP シートで曲げ補強する場合には, シートとコンクリートの接着界面における剝離破壊が考えられることから, RC 部材に接着した FRP シートの曲げ付着性能の評価・検討が重要となる。著者らはこれまで FRP シートで曲げ補強した RC 梁を用いて種々の曲げ載荷実験を行い, FRP シートの曲げ補強効果および剝離性状に関する詳細な検討を行ってきた。その結果, FRP シート補強による曲げ耐力の向上効果, シートの付着特性および剝離メカニズム等を大略把握することができた。¹⁾

本研究ではさらに FRP シート補強による曲げ耐力向上効果およびシートの曲げ付着性状を定量的に把握するため, FRP シート補強量および RC 梁のせん断スパン比をパラメータとした実験を行

った。なお, 検討は荷重-変位関係, 曲げモーメント-曲率関係およびシートの歪分布性状に着目して行っている。

2. 実験概要

本実験に用いた試験体の総数はせん断スパン比 a/d を 5 種類, シート補強量を 2 種類に変化させた全 10 体である。表-1 には試験体の一覧を示している。試験体名は a/d の概略値 (R3 ~ R7) およびアラミド繊維製 FRP (以後, AFRP) シートの貼り付け層数の組み合わせで示している。なお, 本実験では曲げ補強後もせん断耐力が曲げ耐力よりも十分大きくなるように断面設計を行っている。表には設計時のせん断余裕度 (せん断耐力/曲げ耐力) を示している。

図-1 には試験体の概要を示している。図には紙面の都合上 R7, R5 および R3 試験体の概要を示している。試験体は断面寸法 $25 \times 15 \text{ cm}$ で軸方向筋に D16(SD345) を用いた複鉄筋 RC 梁であり, せん断補強筋として D10(SD295A) を 10 cm 間隔で配筋している。本研究では等曲げモーメント区間 (以後, 等曲げ区間) を一律 50 cm とした静的曲げ載荷実験により検討を行っている。また,

*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

*2 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

*3 三井建設 (株) 技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

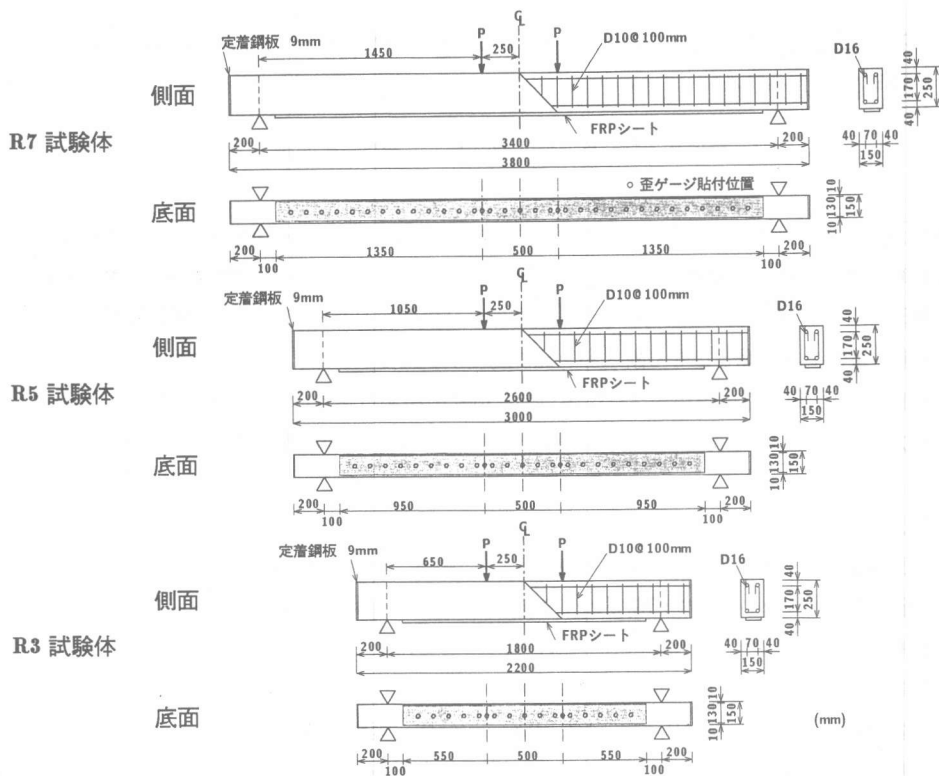


図-1 試験体の概要

梁のせん断スパン長 a を変化させて a/d を 3~7 程度に設定しているため、梁の純スパン長は 1.8 m~3.4 m となっている。本実験に用いたコンクリートは材令：45~57 日，平均圧縮強度 f'_c ：28.2 MPa であり，軸方向筋 (D16) およびせん断補強筋 (D10) の降伏強度はそれぞれ 378.2, 392.0 MPa であった。

試験体底面には保証耐力 600kN/m 程度の AFRP シートを幅 13cm で梁中央部から両支点の 10 cm 手前までの領域に，1 層もしくは 2 層接着している。なお，シート接着範囲は後述の最大荷重時のシートの歪分布より，シートの剝離や RC 梁の破壊現象に何ら影響を与えないことを確認している。シート上にはゲージ長 10mm の歪ゲージを 10cm 間隔および載荷点直下に貼り付けた。なお，シート接着領域にはシートとコンクリートの付着性能を向上させるため，ショットブラスト処理を施している。また，シート貼り付け施工時には，ショットブラスト処理面における下地用プラ

表-1 試験体一覧

試験体名	せん断スパン比 a/d	シート補強量	せん断余裕度
R7-1	6.9	1 層	4.31
R7-2		2 層	3.53
R6-1	6.0	1 層	3.71
R6-2		2 層	3.04
R5-1	5.0	1 層	3.12
R5-2		2 層	2.56
R4-1	4.0	1 層	2.53
R4-2		2 層	2.07
R3-1	3.1	1 層	1.93
R3-2		2 層	1.88

表-2 AFRP シートの力学的特性 (公称値)

目付量 (g/m^2)	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断歪 (%)
415	0.286	126.51	2.48	1.96

イマーの吸収性が高いため，プライマー塗布工を二度行うこととした。表-2 には AFRP シートの力学的特性の公称値を示している。本実験における測定項目は載荷荷重，スパン中央部の変位と上側鉄筋歪および AFRP シート各点の歪である。

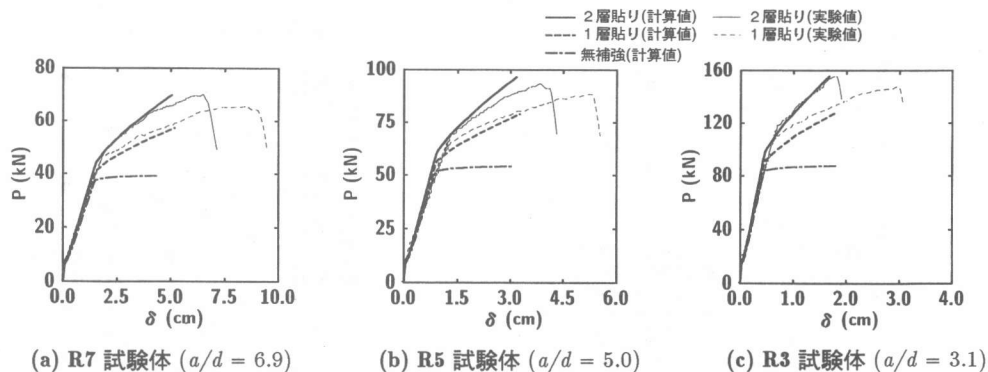


図-2 荷重-変位関係

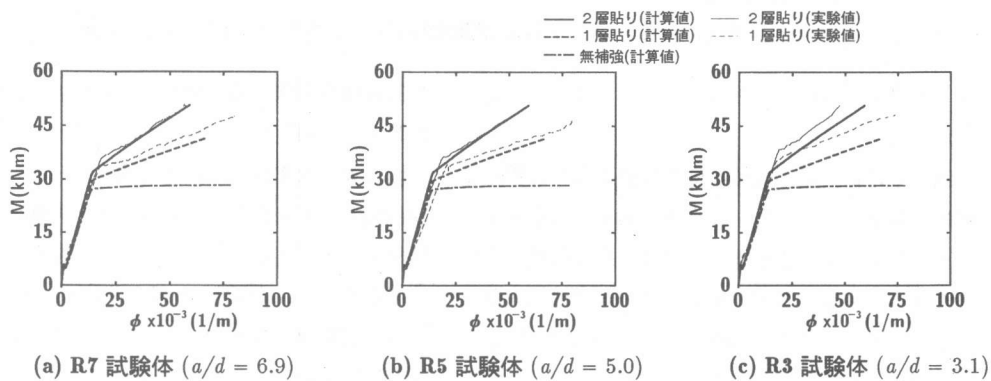


図-3 梁中央部の曲げモーメント-曲率関係

3. 実験結果

3.1 荷重-変位関係

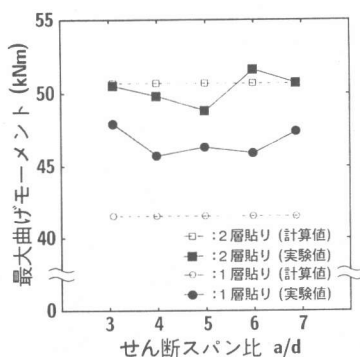
図-2には荷重 P とスパン中央部変位 δ との関係 (以下、 P - δ 曲線) に関する実験および計算結果を R7, 5, 3 試験体について示している。計算結果は前述のコンクリート、主鉄筋および FRP シートの力学的特性を用い土木学会コンクリート標準示方書に準拠して応力-歪関係を設定し、平面保持の仮定のもと断面の曲げモーメント-曲率関係を求める断面分割法を用い、さらに弾性荷重法を援用して算定している。また、計算は AF RP シートとコンクリートとの完全付着を仮定し、梁上縁のコンクリートが終局圧縮歪 $\varepsilon'_{cu} = 3,500 \mu$ に達するまで行っている。なお、本実験では無補強試験体に関する実験を実施していないため、無補強については計算結果のみを示している。

補強試験体の荷重は、曲線の勾配が大きく変化する主鉄筋降伏後も単調に増加する。その増加勾配は 2 層貼りの場合で大きいものとなっている。

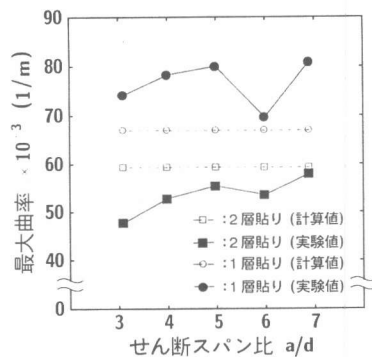
表-3 実験および計算結果の一覧

試験 体名	実験結果		計算結果		P_u/P_c
	P_u (kN)	δ_u (cm)	P_c (kN)	δ_c (cm)	
R7-1	65.4	8.48	57.3	5.19	1.14
R6-1	73.5	6.91	66.4	4.18	1.11
R5-1	88.2	5.32	79.1	3.26	1.11
R4-1	107.5	3.68	97.7	2.49	1.10
R3-1	147.5	2.97	127.8	1.79	1.15
R7-2	69.9	6.52	69.9	5.07	1.00
R6-2	82.6	4.64	81.1	4.06	1.02
R5-2	93.0	3.85	96.5	3.17	0.96
R4-2	117.2	2.93	119.2	2.36	0.98
R3-2	155.1	1.80	155.9	1.68	0.99

また、最大荷重到達後には AFRP シートが剝離し、荷重が急激に低下している。最大荷重近傍の P - δ 曲線を見ると、荷重の増加勾配が若干低下していることがわかる。この低下は 1 層貼りの場合には計算最大荷重到達後、2 層貼りの場合には計算最大荷重到達前に発生しているケースが多い。このことから、シート補強量は P - δ 曲線の実験



(a) 最大曲げモーメント



(b) 最大曲率

図-4 最大曲げモーメントおよび最大曲率とせん断スパン比 a/d との関係

値と計算値の対応に大きな影響を与えていることがわかる。

表-3には荷重-変位関係の実験および計算結果の一覧を示している。表より、 a/d に関わらずシート層数を増加させることにより最大荷重が大きくなっていることがわかる。また、実測最大荷重と計算最大荷重の比 P_u/P_c は1層貼りの場合には全て1.1以上であるが、2層貼りの場合には0.96～1.02となっている。従って、1層貼り試験体の最大荷重は断面分割法で安全側に算定可能であるが、2層貼りの場合には計算値が実験値を過大評価する可能性がある。

3.2 曲げモーメント-曲率関係

図-3にはスパン中央部断面における曲げモーメント M と曲率 ϕ との関係 (以下、 $M-\phi$ 曲線) の実験および計算結果を R7, 5, 3 試験体について示している。なお、実測の曲率はスパン中央部の上側鉄筋歪および等曲げ区間の下縁 AFRP シート歪の平均値 (以下、平均歪) を基に算出したものである。計算結果は $P-\delta$ 曲線の場合と同様に断面分割法により算出している。また、無補強試験体については計算結果のみを示している。補強試験体の曲げモーメントは曲線勾配が大きく変化する主鉄筋降伏後も顕著に増加する。その増加勾配はシート層数の多い場合が大きく示されている。また、実験結果と計算結果を比較すると、 a/d の小さい R3 試験体の実測曲げモーメントが計算結果よりも大きく示されているものの、いずれ

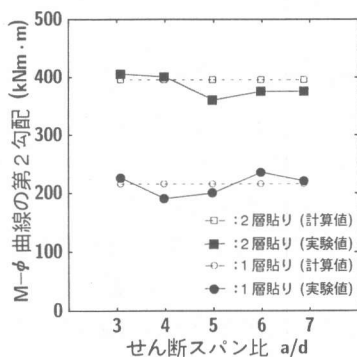
の試験体も主鉄筋降伏後の第2勾配は実験結果と計算結果で精度良く対応している。

図-4には実験結果の最大曲げモーメントおよび最大曲率とせん断スパン比 a/d との関係を計算結果と比較して示している。まず実験結果について考察すると、(a)図より最大曲げモーメントは、シート層数が同等であれば、 a/d にかかわらずほぼ同程度であることがわかる。(b)図より、 $a/d = 6.0$ の場合を除いて、 a/d が小さくなると最大曲率は小さくなる傾向を示している。また、シート層数が増加すると最大曲率は小さく示されている。

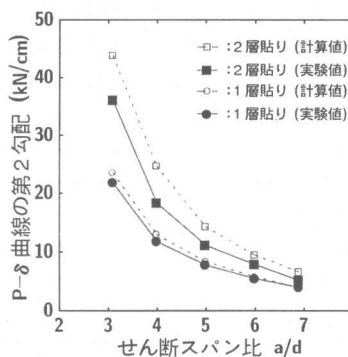
最大曲げモーメントおよび最大曲率に関する実験結果を計算結果と比較すると、1層貼りの場合には両者ともに実験結果は計算結果を上回っている。計算結果は上縁コンクリート圧壊時の値であることから、1層貼り試験体はコンクリートの圧壊に伴う変位曲率の増加によりシートが剥離して破壊したものと考えられる。これに対して、2層貼りの場合には両者ともに実験結果が計算結果を下回る傾向にある。これより、2層貼りの場合には上縁コンクリートの圧壊以前に小さな曲率でシート剥離が生じ破壊していることがわかる。

3.3 AFRP シートの付着状況

図-5には実験結果の $M-\phi$ 曲線および $P-\delta$ 曲線における主鉄筋降伏後の第2勾配とせん断スパン比との関係を計算結果と比較して示している。なお、 $P-\delta$ 曲線の実測の第2勾配は主鉄筋が完全に降伏した点から計算最大荷重近傍までを考慮



(a) $M-\phi$ 曲線の第2勾配



(b) $P-\delta$ 曲線の第2勾配

図-5 $M-\phi$ 曲線および $P-\delta$ 曲線の第2勾配に関する実験および計算結果の比較

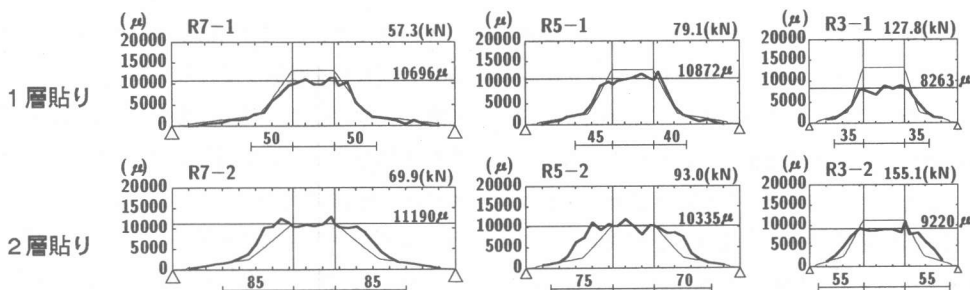


図-6 最大荷重時におけるシートの歪分布性状

して算出している。図より、 $M-\phi$ 曲線の第2勾配の実験および計算結果はせん断スパン比やシート層数に関わらず比較的良く対応していることがわかる。計算結果はシートとコンクリートの完全付着を仮定していることから、いずれの試験体についても等曲げ区間におけるシートとコンクリートの付着は最大荷重時まではほぼ完全なものであるものと推察される。また、 $M-\phi$ 曲線の第2勾配はシート層数に依存し、 a/d に関わらずほぼ一定となっている。一方、 $P-\delta$ 曲線の第2勾配の実験結果と計算結果は1層貼りの場合には比較的良好に対応しているが、2層貼りの場合には実験結果が計算結果よりも小さく示されている。この傾向は、特に a/d の小さい場合で顕著である。これは、後述の FRP シートの歪分布性状に関する考察でも示しているように、 a/d が小さくシート層数が多い場合には載荷点近傍部せん断スパンにおけるピーリング現象によりシートの剝離が進行し、補強効果が低減するためと推察される。

3.4 AFRP シートの歪分布性状

図-6 には最大荷重時におけるシート歪分布に関する実験結果および計算結果との比較を R7, 5, 3 試験体について示している。なお、前述の実測最大荷重と計算最大荷重との比 P_u/P_c が 1.0 以上の場合には P_c 時、1.0 以下の場合には P_u 時の結果を示すこととした。また、図中には等曲げ区間の実測平均歪と、歪が載荷点から線形に低減しほぼ零になるまでの長さを付着抵抗長として明記している。図より、1層貼りの場合には R3 試験体を除いて実験結果と計算結果は比較的良好に対応していることがわかる。しかしながら、2層貼りの場合には実験結果と計算結果は異なった歪分布性状を示している。すなわち、計算結果は等曲げ区間で一定の大きな歪を生じる台形分布を示しているのに対し、実験結果は等曲げ区間よりも左右に 20 ~ 30 cm 程度広い範囲に等曲げ区間と同程度の歪が発生している。これは、等曲げ区間から左右に 20 ~ 30 cm 程度離れた位置で下縁が

表-4 AFRP シートの付着特性

試験体名	平均付着抵抗長さ(cm)	平均付着強度(MPa)	主筋降伏範囲(cm)
R7-1	50.0	0.77	47.0
R6-1	45.0	0.72	40.0
R5-1	42.5	0.93	34.0
R4-1	37.5	1.00	28.0
R3-1	35.0	0.85	21.0
R7-2	85.0*	0.95*	58.0
R6-2	60.0	1.18	50.0
R5-2	72.5*	1.03*	42.0
R4-2	65.0*	1.10*	34.0
R3-2	55.0*	1.21*	26.0

* は P_u 時の実験結果

ぶりコンクリートに発生した曲げと斜めひび割れが交叉することによって形成されたコンクリートブロックが、シートを下方に押し下げて引き剥がすいわゆるピーリング現象が生じたためと考えられる。また、この結果コンクリートブロック形成部近傍の断面剛性が著しく低下し変形曲率が大きくなっているものと推察される。このことは、図-2や図-5において2層貼り試験体の $P-\delta$ 曲線の実測第2勾配が計算第2勾配よりも小さく示されていることと対応している。

3.5 AFRP シートの曲げ付着特性

表-4に図-6より得られる最大荷重時における AFRP シートの曲げ付着特性値の一覧を示している。表中、平均付着抵抗長さは試験体左右の付着抵抗長さの平均値、平均付着強度は等曲げ区間に発生した引張力を平均歪を参考にして算出し、それを平均付着抵抗長さおよびシート幅で除したものである。また、表には断面分割法により得られた主鉄筋の降伏範囲（以下、主筋降伏範囲）も合わせて示している。平均付着抵抗長さと主筋降伏範囲を比較すると、1層貼りの場合には両者は a/d が小さいほど対応しない傾向にあり、その差は最大で 15 cm 程度である。一方、2層貼りの場合には両者の差は R6 試験体を除きほぼ 30 cm 程度となっており、1層貼りの場合よりも大きい。これは1層貼りの場合には a/d が小さいほど、また2層貼りの場合には1層貼りの場合よりも、ピーリング現象の発生するコンクリートブロック

形成位置が主筋降伏点より遠ざかることを意味している。

全試験体の平均付着強度は1層貼りで 0.7~1.0 MPa 程度、2層貼りで 0.9~1.2 MPa 程度であり、全般的に2層貼りの場合が大きい。このことは、シート厚さに関わらず一義的に平均付着強度を用いて曲げ補強設計することが困難であることを示しており、合理的な設計法確立のためには、さらにピーリング現象などの剝離要因を考慮した詳細な検討が必要であるものと判断される。

4. まとめ

本研究では、RC梁に接着した AFRP シートの曲げ付着性状を検討するため、RC梁のシート補強量およびせん断スパン比を変化させて静的曲げ載荷実験を行った。本実験結果より得られた知見を以下に要約する。

- (1) 1層貼りの場合は上縁コンクリートの圧壊に伴う変位曲率の増加によりシートが剝離するため、断面分割法により安全側に最大荷重を算定可能である。
- (2) 2層貼りの場合には上縁コンクリート圧壊前の曲率でピーリング現象によるシート剝離の傾向を示すため、計算値は曲げ耐力を過大評価する可能性がある。
- (3) 2層貼り試験体は最大荷重時以前にせん断区間にピーリング現象を生じるため、この部分の断面剛性が低下し、変位曲率が大きくなる。従って、 $P-\delta$ 曲線の第2勾配に関する実験結果は計算結果よりも小さく示される。
- (4) 最大荷重時における平均付着強度はシート補強量によって異なることより、合理的な曲げ補強設計法確立のためには、ピーリング現象などの剝離要因を考慮した検討が必要である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 佐藤昌志, 栗橋祐介: FRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ付着特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 1399-1410, 1999.